

文章编号: 0258-7025(2009)09-2455-05

He-Ne 激光对增强紫外线-B 辐射小麦叶片胞质 ATP 酶活性的影响

张美萍¹ 陕永杰² 王小花¹ 武娟¹ 韩榕^{1*}

(¹ 山西师范大学生命科学学院, 山西 临汾 041004; ² 山西师范大学城市与环境科学学院, 山西 临汾 041004)

摘要 为探讨 He-Ne 激光对 UV-B 辐射损伤修复途径, 采用 He-Ne 激光 ($5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$) 辐照方法, 对增强 UV-B ($10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 辐射下的六日龄小麦叶片胞质中的 Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶和 Na^+/K^+ -ATP 酶活力变化进行研究。结果表明, 经 UV-B 处理(B)后, 小麦叶片中的 Ca^{2+} -ATP 酶和 Mg^{2+} -ATP 酶活性低于对照组(CK) ($P < 0.01$), Na^+/K^+ -ATP 酶活性高于对照组(CK) ($P > 0.05$); 单独激光(L)处理, 小麦叶片中的 Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶和 Na^+/K^+ -ATP 酶活性高于对照组 ($P < 0.01$); 经 He-Ne 激光和 UV-B 复合处理(BL)后, 小麦叶片中 Ca^{2+} -ATP 酶和 Mg^{2+} -ATP 酶活性高于 UV-B 处理组, 低于对照组, 而 Na^+/K^+ -ATP 酶的活性高于对照组。说明 He-Ne 激光能够提高 ATP 酶活性。表明 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射造成小麦的损伤具有一定的修复作用。

关键词 生物光学; He-Ne 激光; 紫外线-B 辐射; 损伤修复; 小麦

中图分类号 Q631 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2455

Influence of He-Ne Laser Radiation on the ATPase Activity of Wheat Seedling by Enhanced Ultraviolet-B Radiation

Zhang Meiping¹ Shan Yongjie² Wang Xiaohua¹ Wu Juan¹ Han Rong¹

¹ College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China

² College of Urban and Environment Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China

Abstract In order to determine the repair role of laser in the damage induced by ultraviolet-B (UV-B) radiation, the effects of He-Ne laser ($5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$) irradiation on Ca^{2+} -ATPase, Mg^{2+} -ATPase and Na^+/K^+ -ATPase activity in six days seedlings of wheat after enhanced UV-B ($10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) radiated were studied. The results showed that the Ca^{2+} -ATPase activity and Mg^{2+} -ATPase activity under UV-B handling were lower than CK group ($P < 0.01$), Na^+/K^+ -ATPase in contrast ($P > 0.05$); the Ca^{2+} -ATPase activity, Mg^{2+} -ATPase and Na^+/K^+ -ATPase activity under the He-Ne laser radiation were higher than the CK group ($P < 0.01$); and by the use of He-Ne laser and UV-B handling the Ca^{2+} -ATPase, Mg^{2+} -ATPase activity were higher than the one under UV-B handling, but lower than CK group, Na^+/K^+ -ATPase activity was higher than CK group. It suggested that He-Ne laser can improve ATPase activity. It indicated that the damage of wheat seedlings induced by UV-B radiation can be repaired partly by He-Ne laser.

Key words biological optics; He-Ne laser; UV-B radiation; damage and repair; wheat

1 引 言

近年来, 由于氯氟烃等化学物质的大量使用和温室气体的大量释放, 大气平流层臭氧浓度日益下降, 导致到达地面的太阳紫外线 B(UV-B, 280~320 nm) 增强^[1], 这一全球变化已成为国际社会广泛关注的重大环境问题。

研究表明^[2~4], 增强 UV-B 辐射影响植物的生长发育、生理生化过程以至整个地球生态系统, 并造成农作物减产。激光辐照在低剂量时对植物的生长发育有刺激作用, 高剂量时则会出现抑制和诱变效应^[5]。

ATP 酶是一类重要的膜结合酶, 广泛地存在于生物体组织细胞、细胞器膜及胞质中, 与生物体内的

收稿日期: 2008-11-06; 收到修改稿日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(30671061)和山西省青年基金项目(20090211030-2)资助项目。

作者简介: 张美萍(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事环境植物学和生物物理学等方面的研究。

E-mail: zhangmp2006@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: hanrong@dns.sxtu.edu.cn

许多代谢活动及外部环境条件有着密切关系,对维持细胞的正常生理功能起着极为重要的作用。

Ca^{2+} 在植物的生长、发育和信号转导中都具有重要作用。 Ca^{2+} 发挥其作用的条件是维持细胞内 Ca^{2+} 的低稳态水平,研究表明^[6],低温、盐渍、风等刺激都能引起胞质 Ca^{2+} 水平升高,胞内 Ca^{2+} 浓度过高或维持高浓度时间过长会干扰细胞能量代谢和许多生理功能,导致细胞死亡。因此,要维持 Ca^{2+} 正常的生理功能就必须把受刺激升高的胞质 Ca^{2+} 浓度在其完成信息传递后迅速回落到静息态水平,这种动态调节行为主要由 Ca^{2+} -ATP 酶和 Mg^{2+} -ATP 酶来执行^[7]。

Na^+/K^+ -ATP 酶是一种重要生物酶,几乎存在于所有动植物的细胞膜上,是组成 Na^+/K^+ 泵活性的主要部分,与 ATP 分解和细胞内外 Na^+ , K^+ 的转运密切相关,在细胞功能活动、离子平衡等过程中起重要作用^[8]。

本文以小麦为供试材料,分析 UV-B 辐射及 He-Ne 激光对其叶片胞质的 Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶和 Na^+/K^+ -ATP 酶的影响。

2 材料与方 法

2.1 供试材料

选用冬小麦临远 93-4736 (*Triticum aestivum*, cv.), 由山西省农科院小麦研究所提供。

2.2 方 法

2.2.1 种子萌发

共设对照(CK), UV-B 处理(B), 激光处理(L), UV-B 和激光复合处理(BL) 4 组。选取籽粒饱满, 大小均一的小麦种子, 经质量分数为 0.1% 的 HgCl_2 表面消毒后, 培养于有湿滤纸的培养皿内, 每皿 30 粒, 设 3 次重复。25 °C 恒温培养, 种子露白时待处理。处理程序如表 1 所示。

表 1 各处理组设置及处理程序

Table 1 Setting and disposal program of each group

Treatment group	Illumination / (h/d)	UV-B / (h/d)	He-Ne / (min/d)	Darkness / (h/d)
CK	6	—	—	18
B	6*	6	—	18
L	6	—	2	18
BL	6*	6	2	18

* with UV-B radiation simultaneity.

2.2.2 UV-B 辐射处理

UV-B 发生用紫外灯, 将其垂直悬于培养皿上方, 通过调整紫外灯与植物培养皿之间的距离来控制

UV-B 的辐射强度。采用 $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的辐射剂量处理萌发小麦, 每天处理 8 h, 共处理 5 d^[9]。

2.2.3 He-Ne 激光辐照

He-Ne 激光器(MSHN-A-B450 MM, 西北大学光电研究所制造)中心波长为 632.8 nm, 光斑直径为 50 mm, 直接将培养皿垂直放到激光器下的光斑内, 经过前期大量的研究, 本研究选用较大刺激效应剂量为 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$, 120 s, 25 °C^[10]。激光辐照处理安排在夜间进行, 以排除杂光影响, 激光处理后立即转入暗处 25 °C 培养^[9,10]。

2.2.4 蛋白质含量的测定及标准曲线的绘制

蛋白质标准曲线的绘制参照 Bradford 的方法进行^[11]。无机磷标准曲线的绘制参照实验指导的方法进行^[12]。

2.2.5 细胞胞质 Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶和 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的测定

1) 细胞胞质的提取与分离^[13]

称取新鲜小麦叶片 2 g, 加入冷提取介质(质量浓度为 0.35 mmol/L 山梨醇, 0.05 mmol/L Tris-HCl, 2 mmol/L EDTA, 2.5 mmol/L DDT, pH7.5) 10 mL 和少许石英砂于冰浴中研磨, 经 4 层纱布过滤, 滤液用冰冻离心机 500 g 下离心 5 min, 取上清液于 1000 g 下离心 10 min, 取上清液部再用于 11000 g 离心 20 min, 上清液即为细胞溶质部分。

2) 胞质 Ca^{2+} -ATP 酶与 Mg^{2+} -ATP 酶的活性测定^[6]

Ca^{2+} -ATP 酶活性的测定: 取试管 4 支加入 0.5 mL 反应液 (pH7.5, 质量浓度为 0.05 mmol/L Tris-HCl, 50 mmol/L NaCl, 2 mmol/L CaCl_2 , 2 mmol/L EDTA, 5 mmol/L DDT) 和 0.2 mL ATP 溶液混合, 其中三管加入 0.1 mL 酶液于 36 °C 水浴保温 20 min 后, 加入 0.2 mL, 体积分数为 20% 的三氯乙酸终止反应; 另一支试管则先加入 0.2 mL, 体积分数为 20% 的三氯乙酸, 再加酶提取液作为对照, 然后在处理和对照中加入 2 mL H_2O , 3 mL 定磷试剂, 于 45 °C 水浴保温 20 min 后, 测其 OD660 值。 Mg^{2+} -ATP 酶活性的测定方法同上, 以质量浓度为 2 mmol/L MgCl_2 代替反应液中的 CaCl_2 , 其余操作相同。酶活性以分解 ATP 释放无机磷的微克每毫克蛋白质分钟来表示 [$\mu\text{g} \cdot \text{Pi} / (\text{mg protein} \cdot \text{min})$]。

3) 胞质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的测定

采用李锦树等^[9]的方法稍作改动进行。加入 Na^+/K^+ -ATP 酶反应液 0.5 mL, 和 0.2 mL ATP 溶液混合, 再分别加入 0.1 mL 相应酶提取液, 于 36 °C 水浴保温 20 min 后, 分别加入 0.2 mL 的体积分

数为 20% 三氯乙酸(TCA)终止反应,再进行测定。

2.2.6 数据处理

用 SPSS11.5 处理数据,作 t 检验,进行差异显著性分析。

3 结果与分析

3.1 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦 Mg^{2+} -ATP 酶活性的影响

不同处理对 Mg^{2+} -ATP 酶活性的影响结果如图 1 所示。与对照组(CK)相比,单独 UV-B 处理(B)使 Mg^{2+} -ATP 酶活性明显降低,低于对照组 22.4%,并达到差异显著水平($P < 0.01$, $t_{CK,B} = 6.25$),差异极显著;而单独 He-Ne 激光辐照处理(L) Mg^{2+} -ATP 酶活性明显高于对照组 16.4%,并且极显著($P < 0.05$, $t_{CK,L} = 7.84$)。如果 UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照处理(BL),其 Mg^{2+} -ATP 酶活性比单独 UV-B 处理组明显升高($P < 0.01$, $t_{B,BL} = 17.35$),差异极显著。

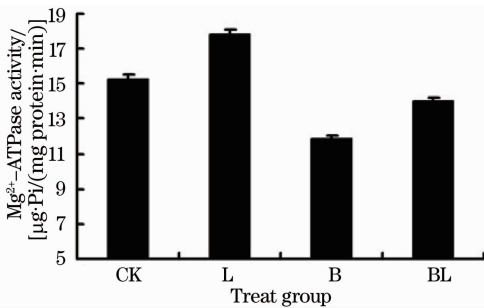


图 1 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦 Mg^{2+} -ATP 酶活性的影响

Fig. 1 Influence of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on the Mg^{2+} -ATPase activities

3.2 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦 Ca^{2+} -ATP 酶活性的影响

不同处理对 Ca^{2+} -ATP 酶活性的影响结果如图 2 所示。与对照组(CK)相比,单独 UV-B 处理(B)使 Ca^{2+} -ATP 酶活性明显降低,低于对照组 31.6%,并达到差异显著水平($P < 0.01$, $t_{CK,B} = 15.6$),差异极显著;而单独 He-Ne 激光辐照处理(L) Ca^{2+} -ATP 酶活性明显高于对照组 14.1%,并且极显著($P < 0.01$, $t_{CK,L} = 6.12$)。如果 UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照处理(BL),其 Ca^{2+} -ATP 酶活性比单独 UV-B 处理组明显升高($P < 0.01$, $t_{B,BL} = 9.82$),差异极显著。

由图 1,2 可以看出,UV-B 辐照后,小麦叶片胞质 Ca^{2+} -ATP 酶和 Mg^{2+} -ATP 酶的活性都有明显

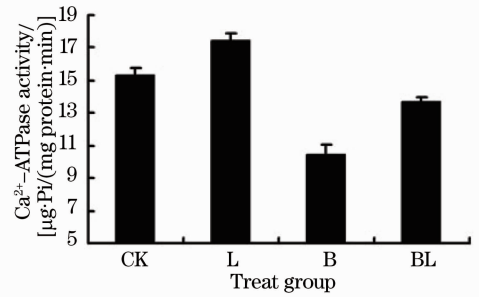


图 2 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦 Ca^{2+} -ATP 酶活性的影响

Fig. 2 Influence of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on the Ca^{2+} -ATPase activities

的降低,由于 UV-B 辐射破坏了 ATP 酶的作用机制;经激光照射后小麦叶片胞质 Ca^{2+} -ATP 酶和 Mg^{2+} -ATP 酶的活性有很大程度的提高,而经 UV-B 和激光复合处理后(BL 组),其 ATP 酶的活性虽有所提高,但仍低于 CK 组。由此可见,增强 UV-B 辐射降低小麦幼苗胞质 ATP 酶活性,He-Ne 激光辐照能够在一定程度上减轻 ATP 酶的降低。

3.3 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响

不同处理对小麦叶片胞质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响如图 3 所示。与对照组(CK)相比,单独 UV-B 处理(B)引起小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性有所升高($t_{CK,B} = 1.168$, $P > 0.05$),差异不显著,UV-B 辐射使机体代谢紊乱,离子交换频率加快,酶受刺激,活性升高;He-Ne 激光处理(L)后的小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性明显高于对照(CK)组,差异极显著($t_{CK,L} = 7.319$, $P < 0.01$),说明一定强度的 He-Ne 激光辐照对小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性能起到提高作用,这是由于激光作用于 Na^+/K^+ -ATP 酶分子使酶的电子-构像相互作用发生改变而促进酶活性的提高^[14];如果 UV-B

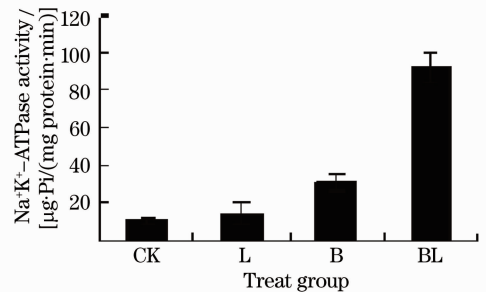


图 3 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射后对小麦 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响

Fig. 3 Influence of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on the Na^+/K^+ -ATPase activities

辐射后再施以 He-Ne 激光辐照小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性较对照(CK)组明显升高($t_{\text{CK,BL}} = 17.664, P < 0.01$), 差异极显著; 且较单独 UV-B 处理(B)组小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶活性也明显升高, 差异极显著($t_{\text{B,BL}} = 14.166, P < 0.01$)。表明 He-Ne 激光可以进一步提高 UV-B 处理的小麦细胞溶质 Na^+/K^+ -ATP 酶, 从而使 Na^+/K^+ 交换平衡, 维持了植物的正常代谢活动。

4 讨 论

ATP 合酶(F_1, F_0 -ATPase)是生物体中能量转换的关键酶, 它存在于线粒体内膜、叶绿体类囊体膜、细菌的质膜上和胞质中^[15]。ATP 合酶由 F_0 和 F_1 两部分组成, F_1 部分有 ATP 合酶功能, F_0 部分有质子运输功能, 这两种功能是被动的和双向的, 只有当这两部分连在一起时, 才能利用质子动力势合成 ATP^[16]。

UV-B 使得 ATP 酶活性降低可能是 UV-B 引起 ATP 合酶各个亚基结构与功能的改变, 进而影响了 ATP 合酶的结构和功能的改变。ATP 合酶在 UV-B 辐射下其活性下降的原因之一是 UV-B 使 F_1 的关键位点氨基酸修饰。UV-B 辐射时间越长, F_1 结构破坏越严重, 其 ATP 酶活性也就越低^[17]。

Na^+/K^+ -ATP 酶是生物膜上一类重要的固有蛋白脂质复合体, 广泛分布于细胞内、外膜和细胞器膜上, 通过磷酸化和去磷酸化作用使构像变化从而发挥功能, 具有载体功能, 专一地对不同离子进行转运以维持细胞内外离子浓度平衡。当细胞内钠离子增多或钾离子减少时, 都会激活钠泵, 把钠离子排出细胞外, 把钾离子吸入细胞内, 阳离子的主动转运需要 ATP 合酶提供能量。一旦 Na^+/K^+ -ATP 酶活性改变将影响细胞离子转运系统, 从而引起细胞受损。 Na^+/K^+ -ATP 酶是在细胞内离子转运和能量代谢过程中起重要作用的酶系统, 其活性在不同的组织内差异很大。 Na^+/K^+ -ATP 酶不仅参与能量代谢、物质运输、氧化磷酸化的主要过程, 而且它与膜上磷脂的结合状态将影响膜的流动性, 从而还会影响膜的其他功能^[18]。

ATP 酶属于膜结合蛋白, UV-B 辐射下生物膜结构以及稳定性发生的变化也同样会影响到 ATP 酶的活性, 而细胞膜系统又通常是 UV-B 辐射伤害的主要部位, 膜脂过氧化加剧, 膜结合酶活性降低, 最终膜透性增加, 膜结构破坏^[17]。所以 UV-B 辐射下植物细胞膜结构功能的稳定性在维持胞质 ATP

酶活性起着十分关键的作用。ATP 酶活性的降低很可能是膜受到破坏的结果。

UV-B 辐照处理小麦后, 细胞溶质的 Na^+/K^+ -ATP 酶活性提高, 机体代谢紊乱, 离子交换频率加快, 酶受刺激, 活性升高^[19], 这是细胞溶质在逆境中建立的自我保护机制, 从而表现出一定程度的适应性。

Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶是 Ca^{2+} 的一个重要调节剂, 能将 Ca^{2+} 由胞内泵到胞外从而维持细胞内外的 Ca^{2+} 梯度。它在细胞内分布广泛, 可调节胞内 Ca^{2+} 浓度, 维持胞质中 Ca^{2+} 的稳态平衡, 而胞质中 Ca^{2+} 稳态平衡是细胞生理活动得以正常进行的必要条件。外界逆境胁迫可以提高胞质 Ca^{2+} 浓度, Ca^{2+} -ATP 酶对此作出反应, 活性增高, 反馈调节将多余的 Ca^{2+} 泵出胞质^[20]。UV-B 作为一种外界胁迫条件提高了胞质中 Ca^{2+} 浓度, 在初期 Ca^{2+} -ATP 酶对其作出反馈调节反应, 活性增高, 但随着辐照时间的增加, 这种反馈调节能力降低, ATP 酶活性减小。

小麦幼苗经增强 UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照(BL), 其 ATP 酶活力比单独 UV-B 处理组(B)明显升高, 而且单独 He-Ne 激光处理(L 组)也可使 ATP 酶活力明显升高。已有研究表明, $2 \text{ min}, 5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的激光处理对生物体有最佳的刺激效应^[9, 21], 本研究也说明低功率激光能激活小麦叶片胞质的 Mg^{2+} -ATP 酶, Ca^{2+} -ATP 酶和 Na^+/K^+ -ATP 酶活性。

激光对生物体的作用主要表现为光效应、电磁效应、热效应和压力效应^[22]。研究表明, 低功率的激光特别是可见光范围的激光, 其产生的热和压力很少。前期对 He-Ne 激光($10 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$)辐照点的叶温进行了研究, 辐照 30 min 时, 辐照点的叶温升高不会超过 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[9]。因此, 激光对生物体的影响就主要表现为光效应和电磁效应。产生光效应的光源必须是线性偏振光, 用非相干的热光源($\lambda = 630 \text{ nm}$)辐照时无效^[22], 证明起作用的就只有激光的电磁效应。磁场通过多种方式影响蛋白质、酶及生物分子的结构, 从而导致生物活性的变化^[21, 23]。酶结构中金属原子 Mg, Ca 的顺磁性、酶蛋白的半导体性及酶反应中各种带电离子的传输等特性^[22], 可能是激光对 ATP 酶产生激活作用, 也可能是激光使 ATP 偶联因子(F_1)的构像发生变化, 导致其 ATP 酶活性升高。 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的激光对增强 UV-B 辐射造成小麦的伤害有一定修复作用。

5 结 论

增强 UV-B 辐射处理使小麦叶片胞质中的 Ca^{2+} -ATP 酶, Mg^{2+} -ATP 酶的活性降低, Na^+ / K^+ -ATP 酶的活性升高, 从而适应增强 UV-B 对植物造成的伤害; He-Ne 激光辐照则可以提高 ATP 酶活性; 适当剂量的 He-Ne 激光辐照可降低和部分修复由增强 UV-B 辐射对小麦造成的损伤, 维持其代谢平衡, 从而利于小麦生长发育和产量提高。

参 考 文 献

- 1 Chuang Shuchun, Lai Weishan, Chen Junhong. Influence of ultraviolet radiation on selected physiological responses of earthworms [J]. *The J. Experimental Biology*, 2006, **209**: 4304~4312
- 2 Zheng Youfei, Yang Zhimin, Yan Jingyi *et al.*. Biological response of crops on enhanced solar ultraviolet radiation and its estimation [J]. *Chinese J. Applied Ecology*, 1996, **7** (1): 107~109
郑有飞, 杨志敏, 颜景义等. 作物对太阳紫外辐射增加的生物学效应及其评估 [J]. *应用生态学报*, 1996, **7**(1): 107~109
- 3 Cai Xian, Xia Hanping, Peng Shaolin. Effect of enhanced UV-B radiation on plant [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(3): 1044~1052
蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响 [J]. *环境生态*, 2007, **16**(3): 1044~1052
- 4 J. H. Bassman, G. E. Edvards, R. Robberecht. Long-term exposure to enhanced UV-B radiation is not detrimental to growth and photosynthesis in Douglas-fir [J]. *New Phytol.*, 2002, **154**: 107~120
- 5 Zhang Qin, Han Rong. Effects of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on photo-chemical activities of chloroplasts in wheat [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 537~542
张琴, 韩榕. 增强 UV-B 辐射和 He-Ne 激光辐照对小麦离体叶绿体光化学活性的影响 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 537~542
- 6 Zeng Shaoxi, Li Meiru. Changes of Ca^{2+} -ATPase activities in cell of rice seedlings during the enhancement of chilling resistance induced by cold and salt pretreatment [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, **41**(2): 156~160
曾韶西, 李美茹. 冷和盐预处理提高水稻幼苗抗寒性期间细胞 Ca^{2+} -ATP 酶活性的变化 [J]. *植物学报*, 1999, **41**(2): 156~160
- 7 Wang Jingming, Li Hongqing, Li Meiru. Characteristics of Ca^{2+} -ATPase of plasma membrane and tonoplast membrane vesicles from roots of rice seedlings [J]. *Communication of Plant Physiology*, 2004, **40**(1): 22~26
王精明, 李洪清, 李美茹. 水稻幼苗根细胞质膜和液泡膜微囊 Ca^{2+} -ATP 酶的特性 [J]. *植物生理学通讯*, 2004, **40**(1): 22~26
- 8 Chen Lisong, Liu Xinghui, Hu Youli *et al.*. Effect of water stress on relative permeability of plasma membrane and Na^+ / K^+ -ATPase activities in various organelles of litchi young seedling leaves [J]. *Chinese J. Tropical Crops*, 1998, **19**(1): 58~63
陈立松, 刘星辉, 胡又厘等. 水分胁迫对抗旱性不同的荔枝实生幼苗叶片膜透性和各细胞器中 Na^+ / K^+ -ATPase 活性的影响 [J]. *热带作物学报*, 1998, **19**(1): 58~63
- 9 Han Rong. Repair effects and protection of laser irradiation on the wheat radiated by enhanced UV-B radiation [D]. Xian: Northwest University, 2002. 40
韩榕. He-Ne 激光对小麦增强 UV-B 辐射损伤的修复效应及机理 [D]: 西安: 西北大学, 2002. 40
- 10 Cai Shuwen, Qi Zhi, Ma Xiaolai *et al.*. Effect of He-Ne laser irradiation on soluble protein synthesis of corn seedling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3): 284~288
蔡素雯, 齐智, 马小来等. He-Ne 激光对玉米幼苗可溶性蛋白合成的影响 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3): 284~288
- 11 Li Hesheng. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 182~185
李合生. 植物生理生化试验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 182~185
- 12 F. Osibo. The Guide of Molecule Biology Experiment [M]. Wang Hailin Transl., Beijing: Science Press, 1998. 232~234
F·奥斯伯. 精编分子生物学实验指南 [M]. 王海林译, 北京: 科学出版社, 1998. 232~234
- 13 Zhang Longxiang, Wu Guoli. Higher Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. 103~149
张龙翔, 吴国力. 高级生物化学实验选编 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 103~149
- 14 Hao Jinhua, Ma Xiaoli, Wang Xiaohua *et al.*. Effects of He-Ne laser on antioxidant systems of wheat seedlings exposed to ultraviolet-B radiation [J]. *J. Wuhan Botanical Research*, 2007, **25**(4): 350~355
郝金花, 马晓丽, 王小花等. He-Ne 激光对 UV-B 辐射小麦幼苗抗氧化系统的影响 [J]. *武汉植物学研究*, 2007, **25**(4): 350~355
- 15 Liu Jianxin, Hu Haobin, Zhao Guolin. Effects of NaCl stress on tonoplast H^+ -ATPase and H^+ -ATPase activities in peganum harmala seedlings [J]. *J. Desert Research*, 2008, **28**(3): 274~279
刘建新, 胡浩斌, 赵国林. NaCl 胁迫对骆驼蓬幼苗液泡膜 H^+ -ATPase 和 H^+ -ATPase 活性的影响 [J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(3): 274~279
- 16 Ni Zhanglin, Wei Jiamian. The structure and catalytic mechanism of ATP synthase [J]. *J. Plant Physiology and Molecular Biology*, 2003, **29**(5): 367~374
倪张林, 魏家绵. ATP 合酶的结构与催化机理 [J]. *植物生理与分子生物学报*, 2003, **29**(5): 367~374
- 17 Hao Jinhua, Ma Xiaoli, Wang Xiaohua *et al.*. Repair effects and damage of cell of wheat seedlings exposed to enhanced ultraviolet-B radiation by He-Ne laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1594~1599
郝金花, 马晓丽, 王小花等. He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦细胞损伤及修复效应 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1594~1599
- 18 Jia Xiuying, Chen Zhiwei. Effects of copper and cadmium on Na^+ / K^+ -ATPase activity in tissues of carassius auratus [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2003, **19**(1): 50~53
贾秀英, 陈志伟. 铜、镉对鲫鱼组织 Na^+ / K^+ -ATPase 酶活性的影响 [J]. *科技通报*, 2003, **19**(1): 50~53
- 19 Liu Min, Li Ronggui, Fan Hai *et al.*. Effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic pigments and some enzymes in tobacco [J]. *Acta Botanica Boreali-Occident. Sinica*, 2007, **27**(2): 291~296
刘敏, 李荣贵, 范海等. UV-B 辐射对烟草光合色素和几种酶的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, **27**(2): 291~296
- 20 Wang Jianbo, Li Rongqian. Changes of Ca^{2+} distribution in mesophyll cells of pepper under heat stress [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1999, **26**(1): 57~58
王建波, 利容千. 热胁迫下辣椒叶肉细胞中 Ca^{2+} 分布的变化 [J]. *园艺学报*, 1999, **26**(1): 57~58
- 21 Han Rong, Wang Xunling, Yue Ming. Influence of He-Ne laser irradiation on damage and repair wheat seedlings by enhanced ultraviolet-B radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 859~864
韩榕, 王勋陵, 岳明. He-Ne 激光对小麦 DNA UV-B 损伤修复的影响 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 859~864
- 22 Xiang Yang. Study on the mechanism of laser variation and biological effect [J]. *J. Optoelectronics · Lasers*, 1994, **5**(4): 87~90
向洋. 激光诱变及生物学作用机制研究 [J]. *光电子·激光*, 1994, **5**(4): 87~90
- 23 Wang Jing, Guo Weisheng. On laser-raised enzyme activity [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8): 765~768
王晶, 郭维生. 激光提高酶活性机理探讨 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(8): 765~768